ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ, МЕТАЛЛУРГИЯ
CHEMICAL TECHNOLOGIES, MATERIALS SCIENCES, METALLURGY



УДК 621.793
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-82-87

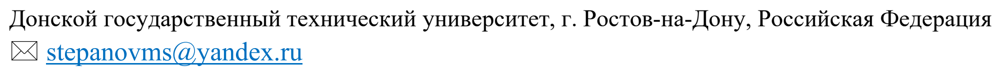
Научная статья



EDN: MPIXIR

Содержание и дисперсность ферросплавов в обмазке при микродуговом легировании стали

М.С. Степанов ✉, **Ю.М. Домбровский**
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
✉ stepanovms@yandex.ru



Аннотация

Введение. Основным недостатком традиционных процессов диффузионного поверхностного упрочнения стальных изделий является большая продолжительность, поэтому проблема интенсификации таких процессов является актуальной. Для ее решения предложено применение высокоэнергетического воздействия на материал, позволяющего получить упрочненный поверхностный слой из обмазки, в состав которой входят порошки ферросплавов, содержащие легирующие элементы. В литературе отсутствуют данные о необходимом содержании и дисперсности таких порошков в составе обмазки. Цель исследования — выбор размера частиц ферросплавов и их концентрации в обмазке для достижения максимально эффективного упрочнения обрабатываемого изделия.

Материалы и методы. Для экспериментальных исследований использовали цилиндрические образцы из стали 20 диаметром 12 мм и длиной 35 мм, на поверхность которых наносили легирующую обмазку, содержащую порошки ферросплавов и электропроводный гель в качестве связующего. После этого образцы погружали вертикально на половину длины в металлический контейнер, который далее заполняли угольным порошком с размером частиц 0,4–0,6 мм. Затем пропускали электрический ток величиной от 2,5 до 3,0 А в цепи источник питания — контейнер — угольный порошок — образец. Продолжительность процесса составляла 2–8 мин.

Результаты исследования. Выполнена расчетная оценка электрической проводимости угольного порошка, рассчитаны теплофизические параметры микродугового нагрева стали: мощность, выделяемая электрическим током на поверхности стального изделия, плотность теплового потока, энергия единичного микродугового разряда. Получены выражения для расчета размера частиц порошка ферросплавов, а также экспериментальные зависимости толщины диффузионного слоя от размера частиц ферросплавов и их содержания в обмазке.

Обсуждение и заключение. Результаты исследования позволили определить диапазон размеров частиц ферросплавов и их содержание в обмазке, позволяющие обеспечить наиболее эффективное легирование поверхности обрабатываемых изделий. Полученные данные будут использованы при разработке технологических процессов поверхностного упрочнения стальных изделий.

Ключевые слова: химико-термическая обработка, энергия микродуги, диффузионное насыщение стали

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и ценные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Содержание и дисперсность ферросплавов в обмазке при микродуговом легировании стали. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2024;8(1):82–87 https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-82-87

Original article

Content and Dispersion of Ferroalloys in the Coating During Microarc Alloying of Steel

Makar S. Stepanov ✉, **Yuriy M. Dombrovskii**
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉stepanovms@yandex.ru

Abstract

Introduction. The main disadvantage of traditional processes of diffusion surface hardening of steel products is its long duration. Therefore, the problem of intensification of such processes is relevant. To solve it, the use of high-energy effects on the material is proposed, which allows us to obtain a hardened surface layer from a coating composed of ferroalloy powders containing alloying elements. There is no data in the literature on the required content and dispersion of such powders in the composition of the coating. The aim of this study was to select the particle size of ferroalloys and their concentration in the coating to achieve the most effective hardening of the processed product.

Materials and Methods. For experimental studies, cylindrical samples made of steel 20 with a diameter of 12 mm and a length of 35 mm were used. On the surface of these samples, an alloying coating containing ferroalloy powders and an electrically conductive gel as a binder was applied. After that, the samples were immersed vertically for half their length into a metal container, which was then filled with carbon powder with a particle size of 0.4–0.6 mm. Then an electric current of 2.5 to 3.0 A was passed in the circuit power source — container — carbon powder — sample. The duration of the process was 2–8 minutes.

Results. The calculated estimation of the electrical conductivity of coal powder was performed, and the thermophysical parameters of microarc heating of steel were calculated. These include the power released by electric current on the surface of the steel product, the density of the heat flux, and the energy of a single microarc discharge. The expressions for calculating the particle size of ferroalloy powder were obtained, as well as the experimental dependencies of the diffusion layer thickness on the particle size of ferroalloys and their content in the coating.

Discussion and Conclusion. The results of this study have allowed us to determine the size range of ferroalloys and their content in the coating. This information is essential for optimizing the alloying process and ensuring the most efficient surface hardening treatment for steel products. The data collected will be used to develop improved technological processes for the surface hardening process, leading to improved product quality and performance.

Keywords: chemical-thermal treatment, microarc energy, diffusion saturation of steel

Acknowledgements. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the valuable comments that improved the quality of the article.

For citation. Stepanov MS, Dombrovskii YuM. Content and Dispersion of Ferroalloys in the Coating During Microarc Alloying of Steel. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2024;8(1):82–87. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-1-82-87

Введение. Продолжительность различных процессов химико-термической обработки (ХТО) стали может достигать 8–10 часов [1, 2]. Поэтому ранее были предложены методы их интенсификации, основанные на применении высокоэнергетического воздействия на материал с использованием плазменного нагрева [3], электро-химико-термической обработки [4], комбинированных способов нагрева [5], лазерной обработки [6], микродугового оксидирования [7], нагрева в электролите [8]. Однако эти методы сложны для практического применения и поэтому не получили широкого распространения. Для интенсификации процессов ХТО целесообразно применение микродугового поверхностного легирования, которое позволяет достичь значительного (в десятки раз) ускорения процесса диффузионного насыщения, и не требует использования сложного оборудования. Особенностью данного метода является погружение обрабатываемого изделия с нанесенной на его поверхность обмазкой в угольный порошок с последующим пропусканием через них электрического тока. Интенсификация процесса насыщения достигается за счет образования ионов диффузанта и их последующей ускоренной диффузии в материал под действием электрического и температурного полей. В ранее проведенных исследованиях достигнуты положительные результаты применения данного метода для диффузионного насыщения хромом, молибденом, ванадием [9], вольфрамом [10]. Для комплексного насыщения на поверхность обрабатываемого изделия предварительно наносилась обмазка, в состав которой входил порошок ферросплава, содержащего диффузант. Эти исследования позволили определить структуру и фазовый состав полученных покрытий, но задача достижения максимальной эффективности упрочнения, для решения которой необходимо определение оптимальных размеров частиц ферросплава и его содержания в обмазке, в ранее проведенных исследованиях не ставилась.

Цель исследования — определение условий максимально эффективного упрочнения стальных изделий методом микродугового легирования за счет выбора размеров частиц порошков ферросплавов и их концентрации в используемой обмазке.

Материалы и методы. Для экспериментальных исследований использовали образцы из стали 20, содержащей 0,2 мас. % С, диаметром 12 мм, на поверхность которых наносили обмазку, приготовленную на основе электропроводного геля с добавкой порошков ферросплавов. Образцы погружали вертикально на половину длины в металлический контейнер диаметром 35 мм, который далее засыпали угольным порошком с размером частиц 0,4–0,6 мм. Далее через образец пропускали электрический ток величиной от 2,5 до 3,0 А в течение 2–8 мин.

Для приготовления обмазки использовали порошки феррохрома, ферромолибдена, феррованадия, ферровольфрама с размером частиц 0,40–0,50 мкм и связующее в объемном соотношении 1:1.

Образцы подвергали шлифовке и полировке по стандартной методике с последующим травлением реактивом Ржешотарского. Микроструктуру диффузионного слоя исследовали с помощью микроскопа Neophot–21.

Для измерения насыпной плотности угольного порошка использовали методику по ГОСТ 32558–2013. Порошок рассеивали по размерам частиц с помощью набора сит по ГОСТ 33 029–2014.

Результаты исследований. Насыпная плотность угольного порошка, т.е. масса единицы объема свободно насыпанного порошка определена экспериментально, полученные значения приведены на рис. 1.

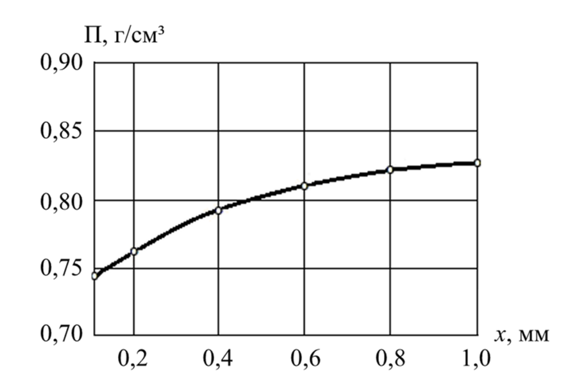


Рис. 1. Зависимость насыпной плотности П угольного порошка от размеров *X* его частиц

В диапазоне размеров от 0,4 до 0,6 мм среднее значение насыпной плотности можно принять равным 0,81 г/см^3. Полученное значение позволило определить объемную плотность угольного порошка как отношение насыпной плотности к плотности каменного угля, значение которого заимствовано из справочной литературы [11] и принято равным 1,6 г/см^3, откуда объемная плотность принята равной 0,81/1,6 = 0,51. Полученное значение примерно соответствует плотности упаковки простой кубической решетки (0,52). Поэтому, согласно [12], можно принять, что общее сопротивление порошковой среды представляет собой сумму сопротивлений последовательных слоев, состоящих из параллельных цепочек из контактного сопротивления R_K между частицами и сопротивление R_M самих частиц (рис. 2).

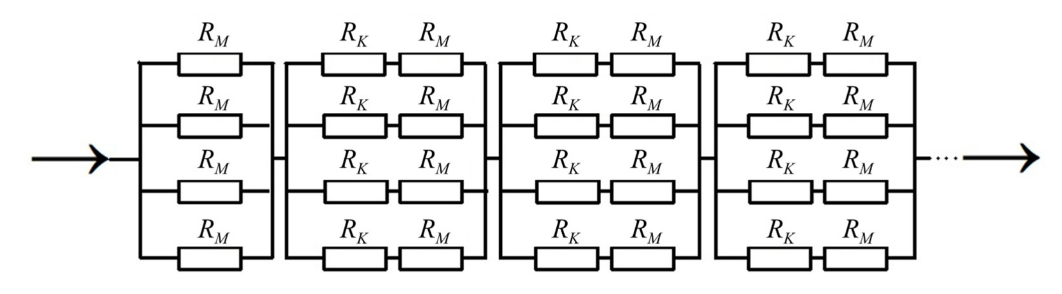


Рис. 2. Электрические контакты угольных частиц в порошковой среде:
R_K — сопротивление межчастичных контактов, R_M — сопротивление отдельной угольной частицы

Расчет по данным рис. 2 позволил оценить общее электрическое сопротивление R порошковой среды:

$$R = \sum_{m=0}^{n} \frac{(R_K + R_M)d^2}{2\pi H(r + dj)} \tag{1}$$

где *m* — количество слоев угольных частиц, *r* — радиус образца; *d* — диаметр частиц, *H* — глубина погружения образца, R_K — сопротивление межчастичного контакта; R_M — сопротивление отдельной угольной частицы. Для расчетов были приняты следующие значения: $d = 0{,}5\cdot10^{-3}$ м, $H = 1{,}5\cdot10^{-2}$ м, $r = 6$ мм, $R_K = 6$ кОм, $R_M = 0$. Значение *R* принято равным 15,5 Ом. Полученное значение позволило рассчитать: мощность электрического тока $P = I^2R$,

энергию единичного микродугового разряда Q_0, поверхностную плотность тока f, плотность q теплового потока. Величина Q_0 определена как отношение мощности тока к суммарному количеству микродуг, которые в течение 1 секунды одновременно воздействуют на нагреваемую поверхность. По данным видеозаписи значение M принято равным 22 500. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Значения теплофизических параметров микродугового нагрева

I, А	$f\cdot10^{-2}$, А/см^2	$P\cdot10^2$, Вт	$q\cdot10^5$, Вт/м^2	$Q_0\cdot10^{-3}$, Дж
2,50	45	0,97	1,71	4,3
2,75	49	1,17	2,07	5,2
3,0	53	1,39	2,47	6,2

Далее рассчитали максимальный размер d_{max} частицы ферросплава, для парообразования которой достаточно энергии одной микродуги.

Необходимое количество теплоты Q, с учетом удельной теплоты сублимации λ, можно записать как: $Q = \lambda m$, где m — масса частицы.

Для сферической частицы плотностью ρ:

$$m = \rho V = \frac{1}{6}\rho\pi d^3 .$$

Поэтому искомое условие имеет вид:

$$\lambda\rho\pi d^3 / 6 \le Q_0 .$$

Максимальный диаметр частицы, необходимый для выполнения этого неравенства:

$$d_{max} = \sqrt[3]{\frac{6Q_0}{\lambda\pi\rho}} . \qquad (2)$$

Рассчитанные значения d_{max} представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчетов

Ферросплав		*Fe+Cr*	*Fe+Mo*	*Fe+V*	*Fe+W*
d_{max}, мм	0,45 А/см^2	0,045	0,043	0,044	0,038
	0,49 А/см^2	0,048	0,046	0,047	0,040
	0,53А/см^2	0,050	0,048	0,050	0,042

Таким образом, установлено, что максимальный размер частиц ферросплавов, используемых в составе обмазки, не должен превышать 38 мкм.

Экспериментально определена толщина диффузионного слоя в зависимости от объемной доли частиц феррохрома в обмазке и ее толщины. Для этого в связующее добавляли порошок феррохрома ФХ010А с размером частиц 40–50 мкм в количестве, необходимом для получения его объемного содержания в пределах 10–50 %.

Результаты представлены на рис. 3. Видно, что максимальная толщина покрытия образуется при объемной концентрации частиц феррохрома в обмазке 50 % и ее толщине 0,5 мм. Таким образом, максимальная интенсификация процесса диффузионного насыщения достигается при условии наибольшего содержания частиц ферросплавов в обмазке, а воздействию микродуг должны подвергаться частицы ферросплава, прилегающие к насыщаемой поверхности.

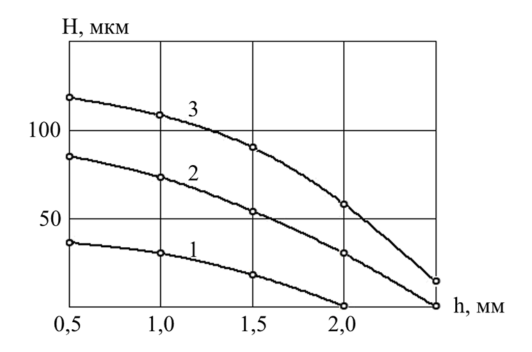


Рис. 3. Зависимость глубины H упрочненного слоя от толщины h слоя обмазки для различного содержания порошка феррохрома (об. %) в обмазке: 1 — 10; 2 — 30; 3 — 50

Обсуждение и заключение. Выполненная расчетная оценка электрической проводимости угольного порошка, используемого для микродугового легирования стальных изделий, позволила установить влияние величины электрического тока в цепи на теплофизические параметры процесса: плотность теплового потока на нагреваемой поверхности, мощность, выделяемую на нагреваемой поверхности, энергию единичного микродугового разряда, возникающего между нагреваемым изделием и окружающей порошковой средой при протекании электрического тока. Полученные результаты позволили определить диаметр частиц ферросплавов, используемых для микродугового легирования, их объемную долю в обмазке, которые обеспечивают достижение наибольшей интенсификации процесса микродугового легирования. Результаты исследований будут использованы при разработке технологических процессов поверхностного упрочнения стальных изделий методом микродугового поверхностного легирования.

Список литературы

1. Mittemeijer E.J., Somers M.A.J. (eds.). *Thermochemical surface engineering of steels.* Woodhead Publishing; 2015. 827 p.

2. Czerwinski F. *Thermochemical treatment of metals.* INTECH Open Access Publisher; 2012. 418 p. http://doi.org/10.5772/51566

3. Берлин Е.В., Коваль Н.Н., Сейдман Л.А. *Плазменная химико-термическая обработка стальных деталей.* Москва: Техносфера; 2012. 464 с.

4. Капуткин Д.Е., Дураджи В.Н., Капуткина Н.А. Ускоренное диффузионное насыщение поверхности металлов при электро-химико-термической обработке. *Физика и химия обработки материалов.* 2020;(2):48–57. https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-2-48-57

5. Александров В.А., Петрова Л.Г., Сергеева А.С., Александров В.Д., Ахметжанова Э.У. Комбинированные плазменные способы химико-термической обработки для создания модифицированных покрытий на инструменте. *СТИН.* 2019;(3):13–16.

6. Liexin Wu, Li Meng, Yueyue Wang, Shuhuan Zhang, Wuxia Bai, Taoyuan Ouyang, et al. Effects of laser surface modification on the adhesion strength and fracture mechanism of electroless-plated coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127927. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127927

7. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Борисов А.М., Крит Б.Л. Микродуговое оксидирование (обзор). *Приборы*. 2001;(9):13–23.

8. Belkin P.N., Kusmanov S.A. Plasma electrolytic carburising of metals and alloys *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2021;57(1):19–50. https://doi.org/10.3103/S1068375521010038

9. Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Давидян Л.В. Оценка механических свойств и природа упрочнения диффузионного слоя при микродуговом ванадировании стали. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2018;61(8):625–630. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-625-630

10. Степанов М.С., Домбровский Ю.М. Создание покрытий карбидного типа при микродуговом термодиффузионном вольфрамировании стали. *Материаловедение.* 2018;(1):20–25.

11. Гюльмалиев А.М., Головин Г.С., Гладун Т.Г. *Теоретические основы химии угля.* Монография. Москва: Московский государственный горный университет; 2003. 550 с.

12. Еремеева Ж.В., Волкогон Г.М., Ледовской Д.А. *Современные процессы порошковой металлургии.* Москва: Инфра-Инженерия; 2020. 207 с.

References

1. Mittemeijer EJ, Somers MAJ. (eds.). *Thermochemical surface engineering of steels.* Woodhead Publishing; 2015. 827 p.

2. Czerwinski F. *Thermochemical treatment of metals.* INTECH Open Access Publisher; 2012. 418 p. http://doi.org/10.5772/51566

3. Berlin EV, Koval NN, Seidman LA. *Plazmennaya khimiko-termicheskaya obrabotka stal'nykh detalei.* Moscow: Tekhnosfera; 2012. 464 c. (In Russ.).

4. Kaputkin DE, Duradji VN, Kaputkina NA. Accelerated diffusion saturation of the metal surface during electro-chemical-thermal treatment. *Physics and chemistry of materials treatment.* 2020;(2):48–57. https://doi.org/10.30791/0015-3214-2020-2-48-57 (In Russ.).

5. Aleksandrov VA, Petrova LG, Sergeeva AS, Aleksandrov VD, Akhmetzhanova EU. Kombinirovannye plazmennye sposoby khimiko-termicheskoi obrabotki dlya sozdaniya modifitsirovannykh pokrytii na instrumente. *STIN.* 2019;(3):13–16. (In Russ.).

6. Liexin Wu, Li Meng, Yueyue Wang, Shuhuan Zhang, Wuxia Bai, Taoyuan Ouyang, et al. Effects of laser surface modification on the adhesion strength and fracture mechanism of electroless-plated coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2022;429:127927. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127927

7. Suminov IV, Epelfeld AV, Lyudin VB, Borisov AM, Krit BL. Mikrodugovoe oksidirovanie (obzor). *Pribory.* 2001;(9):13–23. (In Russ.).

8. Belkin PN, Kusmanov SA. Plasma electrolytic carburising of metals and alloys *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2021;57(1):19–50. https://doi.org/10.3103/S1068375521010038

9. Stepanov MS, Dombrovskii YuM, Davidyan LV. Evaluation of the mechanical properties of diffusion layer in the process of microarc steel vanadation. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2018;61(8):625–630. https://doi.org/10.17073/0368-0797-2018-8-625-630 (In Russ.).

10. Stepanov MS, Dombrovskiy YuM. Deposition of carbide-type coatings during micro-arc thermodiffusion tungstening of steel. *Materialovedenie.* 2018;(1):20–25. (In Russ.).

11. Gyulmaliev AM, Golovin GS, Gladun TG. *Teoreticheskie osnovy khimii uglya.* Monograph. Moscow: Moscow State Mining University; 2003. 550 p. (In Russ.).

12. Eremeeva ZhV, Volkogon GM, Ledovskoi DA. *Sovremennye protsessy poroshkovoi metallurgii.* Moscow: Infra-Inzheneriya; 2020. 207 p. (In Russ.).

Поступила в редакцию 15.12.2023
Поступила после рецензирования 11.01.2024
Принята к публикации 16.01.2024

Об авторах:

Макар Степанович Степанов, доктор технических наук, профессор кафедры управления качеством Донского государственного технического университета, (344002, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), SPIN-код: 3894-8267, ORCID, stepanovms@yandex.ru

Юрий Маркович Домбровский, доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии металлов Донского государственного технического университета, (344002, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1), SPIN-код: 2175-3535, ORCID, yurimd@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М.С. Степанов — расчеты электрических параметров порошковой среды и теплофизических параметров микродугового нагрева, анализ полученных результатов.

Ю.М. Домбровский — экспериментальные исследования, определение технологических параметров процесса микродугового поверхностного легирования, анализ полученных результатов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи

Received 15.12.2023
Revised 11.01.2024
Accepted 16.01.2024

About the Authors:

Makar S. Stepanov, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Quality Management Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344002, RF), SPIN-code: 3894-8267, ORCID, stepanovms@yandex.ru

Yuriy M. Dombrovskii, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Science and Technology of Metals Department, Don State Technical University, (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344002, RF), SPIN-code: 2175-3535, ORCID, yurimd@mail.ru

Claimed contributorship:

MS Stepanov: calculations of electrical parameters of the powder medium and thermophysical parameters of microarc heating, analysis of the results.

YuM Dombrovskii: experimental studies, determination of technological parameters of the microarc surface alloying process, analysis of the results.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.